

核融合炉第一壁を模擬した複雑流路内を流れる高プラントル数流体の熱流動場解析

著者	佐竹 正哲
号	53
学位授与番号	4090
URL	http://hdl.handle.net/10097/42504

	さ たけ まさ あき
氏 名	佐 竹 正 哲
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成21年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	核融合炉第一壁を模擬した複雑流路内を流れる高プラントル数流体 の熱流動場解析
指 導 教 員	東北大学教授 橋爪 秀利
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 橋爪 秀利 東北大学教授 笹尾 眞實子 東北大学教授 長谷川 晃 東北大学講師 結城 和久

論 文 内 容 要 旨

現在、地球温暖化が深刻な問題となってきた。この地球温暖化は化石燃料の燃焼に伴って排出される二酸化炭素によって引き起こされると考えられている。化石燃料は火力発電と車、飛行機や船などの輸送機器で主に消費されている。このうち、火力発電に使用される化石燃料はオイルショックの影響によるエネルギー転換により四半世紀の間に減少している。しかし、輸送機器の大半は化石燃料を使用したままであり、その総数は増加し続けている。輸送機器の大半を占める自動車の燃料として現在はガソリンや軽油が使われているが、これらの代替品として水素燃料が候補に挙げられ、その実用化に向けて研究が進められている。また、動力に電気エネルギーを用いる電気自動車の実用化も進められている。そのような中で、次世代の核分裂炉と核融合炉では発電と共に水素製造を行うことが提案され、設計が進められている。研究開発が進められている次世代の核分裂炉の中には高速増殖炉も提案されており、核燃料サイクルが実現することによって使用済みのウランを準国産エネルギーと見なせるようになる。また、核融合炉で使用する燃料のうち重水素は海水から得ることができ、三重水素は発電中に増殖していくため、稼働後はほぼ国産エネルギーで動くことになる。従って、これらの炉が実現すれば、日本のエネルギー自給率が上昇することになり、情勢が不安定な中東から原油の大半を輸入している現状よりエネルギーセキュリティが高まることになる。さらに、これらは発電中に二酸化炭素を排出しないため、地球温暖化対策にも貢献する。その次世代核分裂炉と核融合炉では、溶融塩が冷却材の候補に挙げられている。溶融塩の利点は、核分裂炉においては核燃料の転換率が高いことが挙げられる。核融合炉においては磁場によって引き起こされるMHD(Magnet Hydrodynamics)圧力損失を低減することと、溶融塩内に含まれるリチウムによって三重水素が増殖され、ベリリウムによって中性子が増倍することが利点として挙げられる。しかし、溶融塩は高プラントル数流体であるため、特に核融合炉においては熱伝達促進が必要となる。熱伝達促進手法として、スワール管と球充填管の利用が提案され、研究が行われている。スワール管に関しては、数値解析によって磁場下の高プラントル数流体での熱伝達促進が確かめられている。また、球充填管に関しては非磁場下での高プラントル数流

体の伝熱実験が行われ、低流速での高熱伝達促進が確認されている。しかしながら、これらの手法はまだ研究が始まったばかりであり、他の伝熱促進手法に関しても研究を行い、選択肢を増やすことが望ましい。そこで、本論文ではそれらの伝熱促進に並ぶ手法として、管内に角柱を挿入することによって熱伝達を促進する手法を提案する。この手法の利点の一つは、スワール管や球充填管に比べると単純な体系で熱伝達を促進できることが挙げられる。

管内に角柱を挿入することによる熱伝達促進効果を数値解析によって評価できるように手法を構築する必要がある。管内を模擬して三次元での数値解析を実施する場合には高い計算機能力と長い計算時間を要する。従って核融合炉の設計の観点からは、三次元解析よりも低い計算機能力かつ短い計算時間で解析できる二次元解析が適していると考えられる。そのため、本研究では、二次元解析がどの程度管内の角柱後流の三次元の流れ場を再現できるかを確かめることを目指す。はじめに、解析結果と比較する実験結果を得るために、管内の角柱後方の流動場を粒子画像流速測定法(PIV)を用いて可視化した。実験で用いた管の断面積は 0.1m^2 、角柱の大きさは $0.015\text{m}^2 \times 0.1\text{m}$ であり、角柱と流路幅の比は $0.15:1.00$ である。角柱は流路の中央に挿入した。そして、作動流体には水を用いた。実験は角柱を代表長さとするレイノルズ数が3000から7000の範囲で行われた。このレイノルズ数の領域では、渦の放出周波数がほぼ一定であることが確認された。得られた実験結果を、角柱と流路幅の比が $0.075:1.000$ となる体系で風洞にて行われた実験結果と比較した。この比較から、角柱と流路幅の比が $0.15:1.00$ の場合の角柱から放出される渦の周波数が、角柱と流路幅の比が $0.075:1.000$ の場合よりも高いことが判明した。無次元化した周波数、ストローハル数で比較すると、角柱と流路幅の比が $0.15:1.00$ と $0.075:1.000$ のそれぞれの場合で、 0.18 と 0.13 となり、 $0.15:1.00$ の方が約1.4倍高くなることが確認された(図1)。これは、 $0.075:1.000$ よりも $0.15:1.00$ の場合の方が角柱前縁と衝突して剥離した流れが再付着する流れが多いため、角柱後縁で剥離する流れが増え、渦の放出周波数が $0.15:1.00$ の方が $0.075:1.000$ よりも高くなるためである。また、渦度の比較を行った結果、後流と壁近傍で高いことが判明した。渦度が高ければ流体の回転運動によって内部へと熱が輸送されやすくなるため、壁近傍の渦度が高いことは熱伝達が促進される可能性が高いことを意味している。

次に、二次元数値解析結果と上で得られた実験結果の比較を実施した。解析体系に関しては、角柱の大きさと流路幅、レイノルズ数は実験と同じとした。乱流モデルには $k\text{-}\epsilon$ モデルを用いた。この $k\text{-}\epsilon$ モデルは工学分野では広く用いられているモデルである。複数ある $k\text{-}\epsilon$ モデルのうち本研究ではAKNモデルを用いた。このモデルはコルモゴロフスケールを用いることで剥離・再付着を伴う流れの再現性が高いという利点がある。コルモゴロフスケールは渦が消滅する直前のスケールである。まず、時間スケールの再現性を検証するために、角柱後縁から放出される渦の周波数の比較を行った。その結果、実験結果の誤差を考慮に入れると、数値解析と実験結果はほぼ同じであることが判明した(図1)。これは数値解析がタイムスケールに関しては実験結果を正しく再現できることを意味している。従って、角柱を挿入することによって引き起こされる温度場の非定常現象を定量的に評価する

ことができる。一方、空間スケールの再現性を確かめるために、角柱後縁から渦が消滅するまでの距離と渦度の比較を行った。まず、角柱後縁から渦が消滅する位置までの距離を比較したところ、数値解析の方が実験結果よりも約二倍長いことがわかった(表 1)。次に、数値解析と実験結果の渦度の比較を行った。実験結果と同様に後流渦と角柱及び壁近傍における渦度が高いことが判明した。渦度の大きさは数値解析結果の方が実験結果に比べて約 1.5 倍高かった。これらの差は、断面方向のエネルギー散逸を数値解析では過小評価してしまっているためであると考えられる。従って、熱伝達が促進される領域を過大評価してしまう可能性がある。しかし、数値解析結果と実験結果の傾向や分布が一致しており、その大きさが同オーダーであることから、空間スケールを定性的に再現できていると言える。よって、二次元解析によって角柱を挿入することによる伝熱促進効果を定性的に評価することが可能であることが判明した。

最後に、平行平板に角柱を挿入した体系での高プラントル数流体の熱流動解析を実施した。解析には温度場に法手式モデルのうちコルモゴロフスケールを使用しているモデルを採用した。また、作動流体には核融合炉で使が考えられている溶融塩 Flibe を用いた。流路幅に対して 1/6 と 1/3 の大きさの角柱をそれぞれ挿入し、各々の解析結果を比較し熱伝達促進効果を調べた。そして、核融合炉を模擬して片面にのみ熱流束を負荷し、その大きさは 0.5MW/m^2 とした。まず、どちらの角柱でも角柱を挿入することによって壁面温度が非定常になることが確認された。しかしながら、その強度はあまり大きくはなかった。従って、角柱と壁の距離が短くすることによって、非定常性を強める必要があると考えられる。また図 2 から、ヌッセルト数は角柱前縁付近から上昇し始め、角柱後縁よりも下流で最大値となった後、減少していく傾向が確認された。ヌッセルト数が最大となるのは、角柱後縁から角柱の大きさの約二倍下流の位置であった。流路と角柱の距離は 1/6 の大きさの角柱よりも 1/3 の大きさの角柱を挿入した時の方が短いため、壁面近傍の流速は 1/3 の大きさの角柱を挿入した時の方が速くなり、その結果、ヌッセルト数は 1/3 の角柱を挿入した時の方が 1/6 の角柱を挿入した時よりも大きくなった。ヌッセルト数の分布と壁面近傍の流速、渦度と乱れエネルギーの分布を比較したところ、ほぼ同じ分布を示すことが確認された。従って、流動解析結果から熱伝達促進効果を予測することができることが判明した。これらの結果から、乱流状態の高プラントル数流体でも角柱を挿入することによって熱伝達が促進されることが確かめられた。

本研究では、二次元数値熱流動解析によって角柱周りの三次元の流れ場と温度場を定性的に再現することに成功した。これによって、角柱挿入を挿入することによって熱伝達促進効果が得られるかを定性的に評価できるようになった。熱流動解析より、単一角柱を挿入した場合は熱伝達が促進される領域が短いことが判明した。従って、実機では流れ方向に複数本角柱を配置することによって、熱伝達促進領域を広げる必要がある。その場合、様々な角柱配置が考えられるが、ヌッセルト数の分布と壁面近傍の流動場の分布の間に成り立つ関係から、ある程度角柱配置のパターンを絞り込むことができる。その後、熱流動解析を行うことによって、最も熱伝達を促進する配置を決定することにより、実機での角柱挿入による熱伝達促進が可能となる。

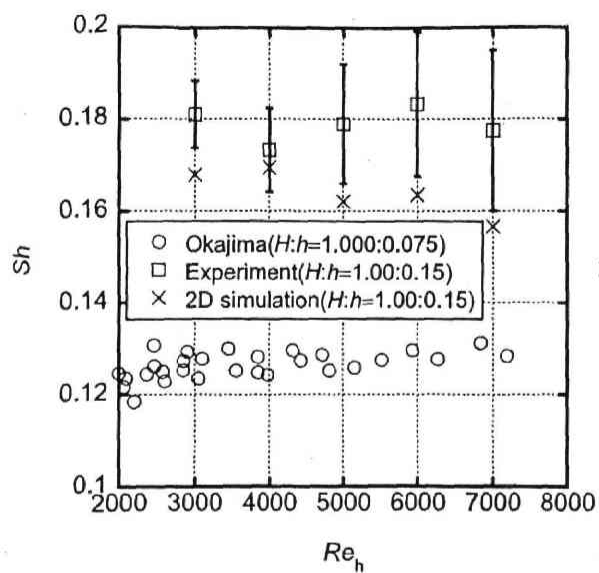


図 1.角柱レイノルズ数とストローハル数の関係

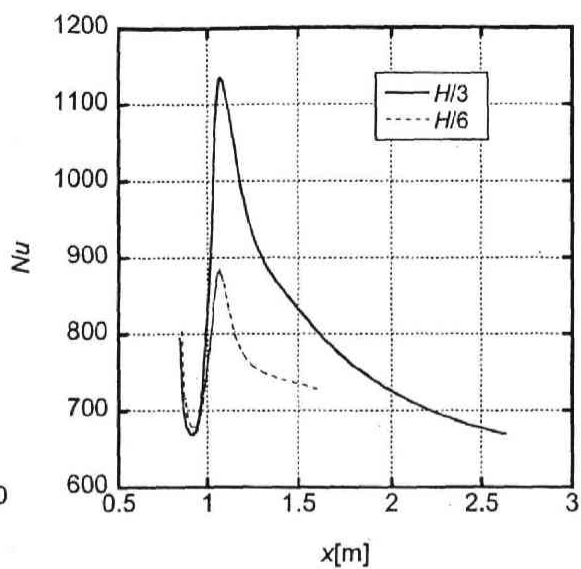


図 2.角柱挿入によるヌッセルト数の変化

	上端	下端
解析(2D)	0.472	0.445
実験(3D)	0.155	0.199
解析(2D)/実験(3D)	3.045	2.236

表 1.数値解析と実験の渦の消滅位置の関係

論文審査結果の要旨

溶融塩 Flibe を用いた核融合炉においては、Flibe は粘性が極めて高い、高プラントル数流体であるため、第一壁に負荷される高熱流束を除去するためには熱伝達促進が必要となる。高粘性による高いポンピングパワーの低減と電気分解による内壁腐食の危険性から低流速での除熱が求められており、スワール管や球充填管の研究がなされている。本研究ではこれらに並ぶ手法として角柱を挿入することによる熱伝達促進を提案する。この手法による熱伝達促進効果を、炉設計における計算負荷を考慮して二次元数値解析によって評価することを目的とする。また、矩形管内の角柱後流の三次元現象を二次元解析で再現することで発生する差異を、可視化実験の結果と比較して明らかにすることも目的とする。第 1 章では、上記に示されるような研究の背景および目的を述べ、角柱周りの流動場に関する研究の現状、高プラントル数流体の熱流動解析の現状について説明を行っている。第 2 章では、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて、矩形管内に設置された単一角柱の後流の計測を行っている。流路幅と角柱の比が異なる実験及び解析結果との比較から、その比が大きいほど渦の放出周波数が高くなることが明らかにされている。第 3 章では、二次元数値解析結果と第 2 章で得られた実験結果との比較が行われている。両者の渦の放出周波数を比較することにより、時間スケールでの一致が確認されている。一方、二次元数値解析では断面方向のエネルギー損失が過小評価されるため、渦の消滅位置が角柱後流方向に 2-3 倍長くなること、および、角柱後流の渦度の大きさが 1.5 程度大きく評価されることが判明した。しかし、オーダーでは一致していることから角柱挿入による熱伝達効果を定性的に評価することが可能であることが示されている。第 4 章では、流路中心に角柱を挿入し、第一壁を模擬して片面から熱負荷を加えた体系での熱流動解析が行われている。2 種類の異なる寸法の角柱に対してそれぞれ熱流動解析が行われ、どちらの場合でも高プラントル数流体においても熱伝達が促進されることが確認され、寸法が大きい角柱を挿入する方がより熱伝達が促進されることが示されている。また、熱伝達率の分布と壁面近傍の流動構造の分布が似ていることから、流動解析により熱伝達促進効果を予測できることが示されている。第 5 章では、これまでの章で得られた知見がまとめられており、第 4 章で得られた結果から実機において本研究で用いた手法で熱伝達を促進する上での指針及び注意点が示されている。

このように、本論文は、溶融塩 Flibe を用いた核融合炉において求められる低流速での熱伝達促進手法として、角柱を挿入する方法も有効であることが示された。また、本研究で構築された熱流動場解析手法を用いて、障害物が挿入された体系での熱伝達促進効果の定性的評価が可能となった。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。